



ÇELİK KAFES BİR DEMİRYOLU KÖPRÜSÜNÜN HASARGÖREBİLİRLİK DEĞERLENDİRMESİ

Seda Konor¹, Kadir Özakgöl¹ ve Barlas Özden Çağlayan¹

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the probability of failure of an existing steel railway bridges in Turkey. In order to accomplish that objective, a multispan continuous truss bridge with total length of 103.80 m was investigated. Finite element models of the bridge was constructed through SAP2000 software based on original design drawings that were provided by TCDD. Furthermore, original model was compared with field measurements that gained from previous report. In case of more than 1% difference between relevant parameters, it was decided to develop original model. Subsequently, 60 earthquake records were determined from different soil classes, original and updated finite elements models were subjected to nonlinear time history analyses under those records. According to obtained results from these analyses, fragility analyses of original and updated bridge models were performed and fragility curves of were obtained.

ÖZET

Sunulan bu çalışmanın amacı Türkiye’de mevcut bir çelik demiryolu köprüsünün hasargörebilirlik durumunun değerlendirilmesidir. Bu kapsamda toplam uzunluğu 103.8 m olan iki açıklıklı sürekli kafes kirişli köprü incelemesi yapılmıştır. Köprüye ait sonlu elemanlar modeli, TCDD tarafından sağlanan orijinal çizimlere göre SAP2000 programı aracılığı ile oluşturulmuştur. Sonrasında, bu orijinal modeller, önceki çalışmalarda sunulan arazi ölçümlerinden elde edilen dinamik parametreler ile kıyaslanmıştır. İlgili parametreler arasındaki farkın 1% den büyük olması durumunda orijinal modellerin geliştirilmesine karar verilmiştir. Çalışmanın devamında farklı zemin sınıflarından deprem ivme kayıtları belirlenmiş ve köprüye ait orijinal ve geliştirilmiş sonlu elemanlar modelleri seçilen ivme kayıtları altında doğrusal olmayan zaman-tanım alanında analizlere maruz bırakılmıştır. Bu analizlerden elde edilen sonuçlara göre, orijinal ve geliştirilmiş köprü modellerinin hasargörebilirlik eğrileri elde edilmiştir.

GİRİŞ

Geliştirilmeye başlandığı 16. yüzyıldan itibaren modern çelik kafes köprüler, konvansiyonel betonarme köprülere göre daha hafif, daha hızlı ve daha etkili tasarım sonuçları sundukları için yaygın olarak kullanılmaktadırlar [1,2]. Bu sebeple bu tip köprülerin değerlendirilmesi ekonomik açıdan oldukça önemlidir. Hasargörebilirlik eğrileri ise, yapı hakkında yapı-zemin etkileşimi ve zemin sınıfı gibi durumlarda çeşitli belirsizliklerin bulunması halinde, yapının değerlendirilmesi için tercih edilen bir yöntemdir [3].

Literatürde, hasargörebilirlik eğrilerinin elde edilmesi için kullanılan farklı yöntemler mevcuttur. Uzman görüşü yöntemi, Applied Technology Council tarafından ATC-13 [4]

raporunda açıklandığı üzere yapının hasargörebilirlik matrislerinin sistematik sorular sorulup bu soruların cevaplarının deneyimli mühendislerden elde edilmesi esasına dayanır. Diğer bir yöntem olan Ampirik yöntemde hasar verisi, deprem sonrasında gerçek yapı üzerinden alınır. Bu yöntem, Kobe depremi [3,5,6] ve Northridge depremi [7] sonrası bazı köprülerin hasargörebilirlik değerlendirmesinin yapılması için araştırmacılar tarafından tercih edilmiştir. Hasargörebilirlik değerlendirmesi için gözleme dayalı yöntemlerin yanı sıra Analitik yöntemler de mevcuttur. Analitik yöntemlerde, deprem etkileri altındaki talebin tahmin edilmesi için elastik spektral analiz [8,9], doğrusal olmayan statik analiz [10,11] ve doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz [12,13,14,15] yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında hasargörebilirlik analizinde kullanılmak üzere analitik yöntem olarak, gerçek deprem yüklerinin yapıya doğrudan etki ettirilmesine olanak sağlayan zaman tanım alanında analiz yöntemi tercih edilmiştir.

Bu yönteme göre hasargörebilirlik eğrisinin iki parametrelili lognormal dağılım fonksiyonu ile ifade edilebildiği varsayılmaktadır. Varsayım doğrultusunda, belirli yer değiştirme seviyesinin (D) kümülatif olarak aşılma olasılığı:

$$P[\leq D] = \Phi\left(\frac{\ln X - \lambda}{\zeta}\right)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir. Burada Φ standart normal dağılım, X deprem etkileri altında hesaplanan lognormal yer değiştirme, λ ve ζ $\ln X$ 'e ait ortalama ve standart sapma parametrelerinin değerleridir.

YÖNTEM

Çalışma kapsamında kullanılan yöntemin ana hatları Şekil 1'de özetlenmiştir. Bu doğrultuda,

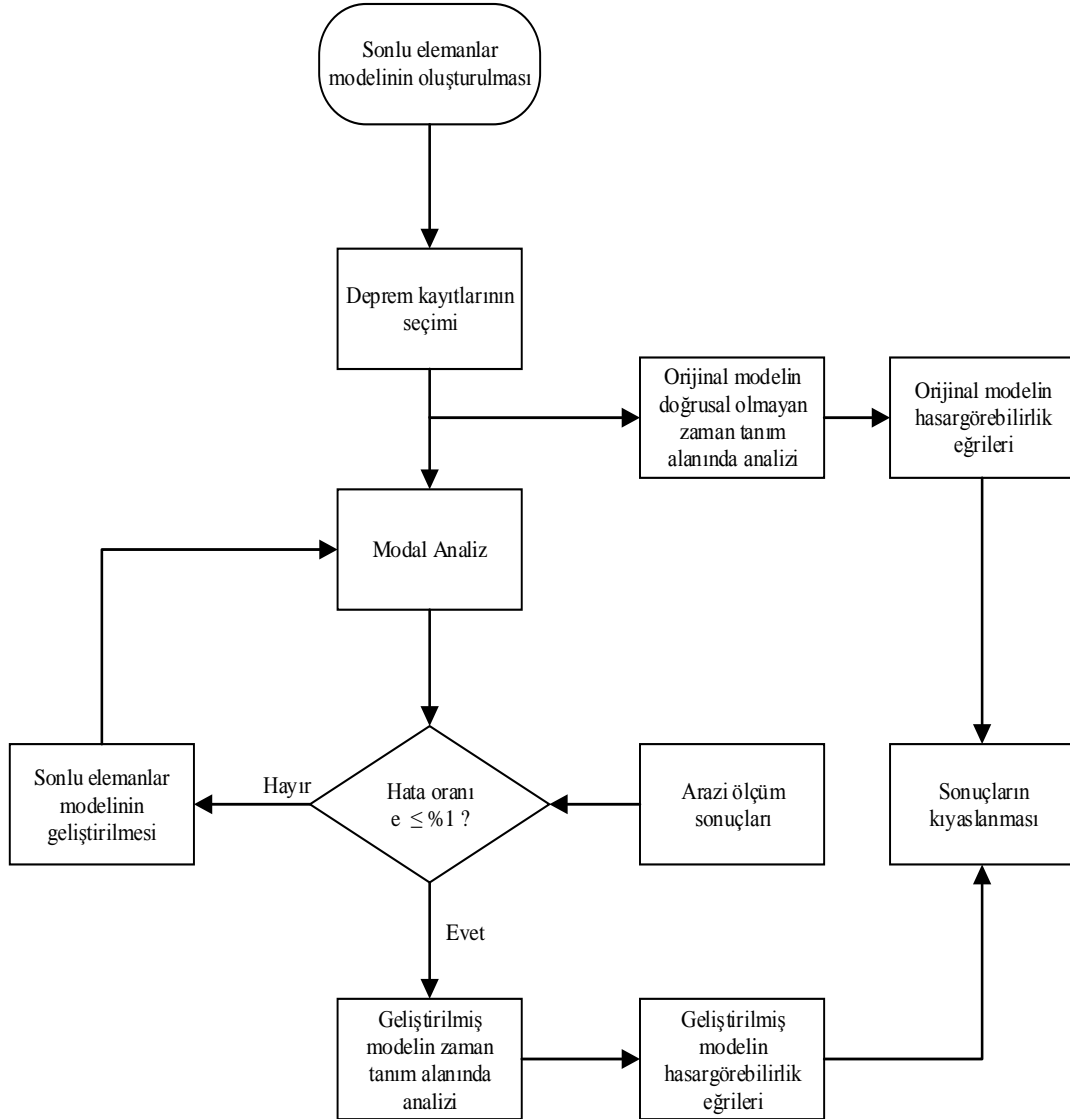
1. Öncelikle A,B ve C zemin sınıflarından toplamda 60 adet deprem kaydı, doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizlerde kullanılmak üzere belirlenmiştir.
2. Analitik çalışmalarda kullanılmak amacıyla köprüye ait orijinal sonlu elemanlar modeli, TCDD tarafından sağlanan orijinal çizim paftalarına göre SAP2000 programı [16] aracılığıyla oluşturulmuştur.
3. İlk olarak orijinal model üzerinde doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiş ve bu modele ait hasargörebilirlik eğrileri elde edilmiştir.
4. Sonrasında, orijinal sonlu elemanlar modelinin dinamik parametreleri, daha önceki bir çalışmada [17] yer alan arazi ölçüm değerleri ile kıyaslanmıştır. Parametreler arası fark hata oranı (e)

$$5. \quad e = \frac{f_i - f_0}{f_0}$$

formülü ile hesaplanmıştır. Burada f_i sonlu elemanlar modelinden, f_0 arazi ölçümlerinden elde edilen frekans değerleridir.

6. e değerinin %1'den fazla olması durumunda ilgili sonlu elemanlar modelinin geliştirilmesine karar verilmiştir. Köprü sınır şartlarının yeniden tanımlanması ile uygulanan geliştirme işleminde, köprü mesnetlerinin zaman içinde değişebileceği öngörüsüne dayanarak, bu noktalara köprü boyuna (X), enine (Y) ve düşey (Z) doğrultularında lineer yaylar atanarak bu yay katsayılarının arazi ölçüm sonuçlarına göre uyarlanması işlemi yapılmıştır.

7. Model geliştirme işlemi ile arazi ölçüm sonuçları ve analitik modele ait sonuçlar arasındaki hata oranı hedeflenen seviyenin altına indirildikten sonra, geliştirilmiş model üzerinde de aynı deprem kayıtları altında doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizler gerçekleştirilmiş ve bu modele ait hasargörebilirlik eğrileri de elde edilmiştir.
8. Orijinal ve geliştirilmiş modellere ait hasargörebilirlik eğrilerinin aynı grafik üzerinde çizdirilmesi ile model geliştirme işleminin eğriler üzerindeki etkisi irdelenmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan yöntemle ait akış şeması

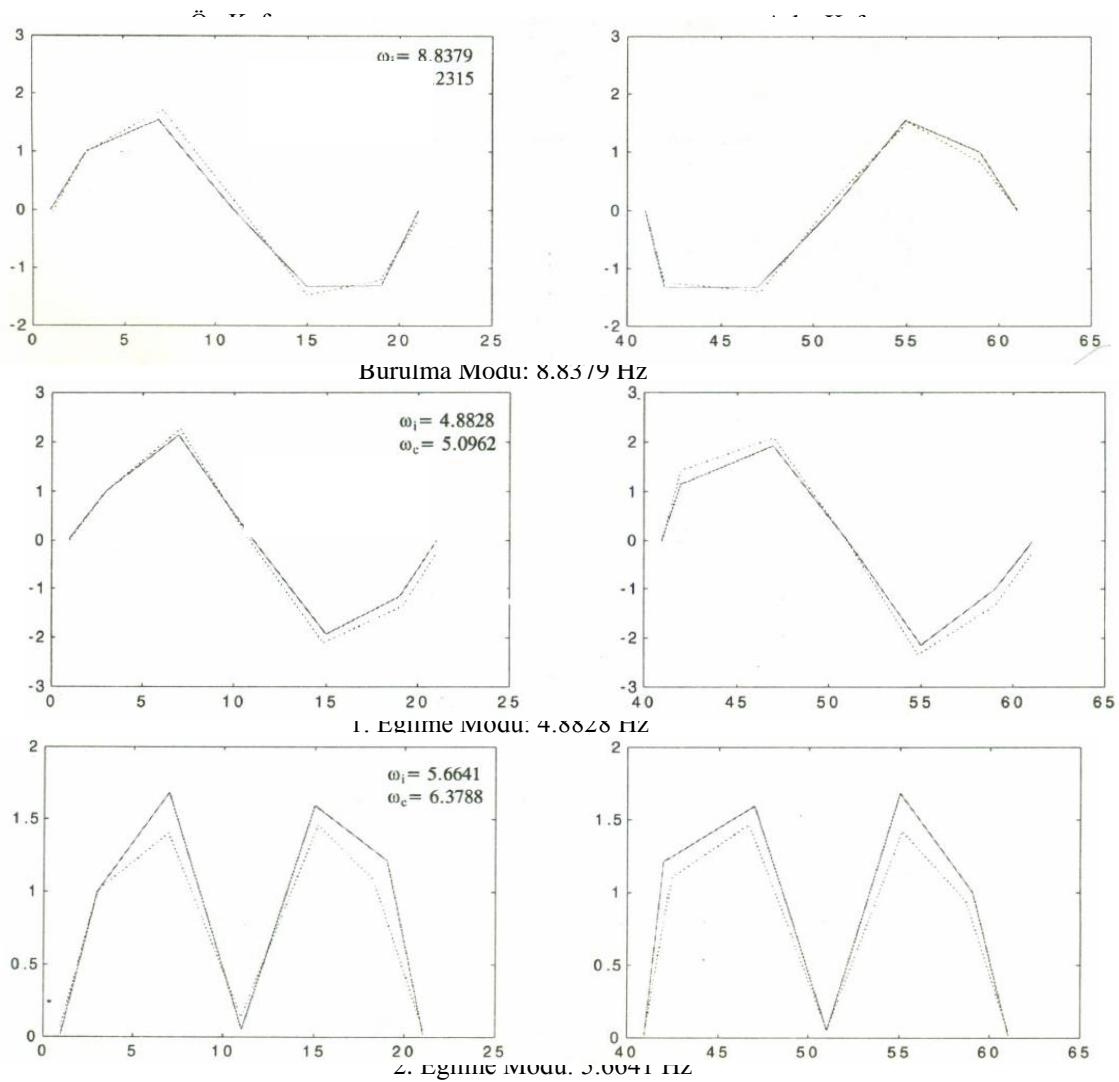
SAYISAL UYGULAMA: CAMBAZKAYA KÖPRÜSÜ ÇALIŞMALARI

Çalışma kapsamında, Sakarya Nehri üzerinde yer alan ve 1933 yılında Fried ve Krupp tarafından tasarlanan iki açıklıklı sürekli çelik kafes kirişli Cambazkaya Köprüsü incelenmiştir. Köprü, İstanbul'un 188 km doğusunda, İstanbul-Ankara ana hattı üzerinde yer almaktadır. Köprü'nün bir açıklığının uzunluğu 51.90 m ve toplam uzunluğu 103.80 m'dir. Köprü'nün yüksekliği ve genişliği sırasıyla 6.80 m ve 4.90m'dir. Köprü eksenine göre 25.53° eğiklik mevcuttur. Köprüye ait genel görünüş Şekil 2'de verilmiştir.



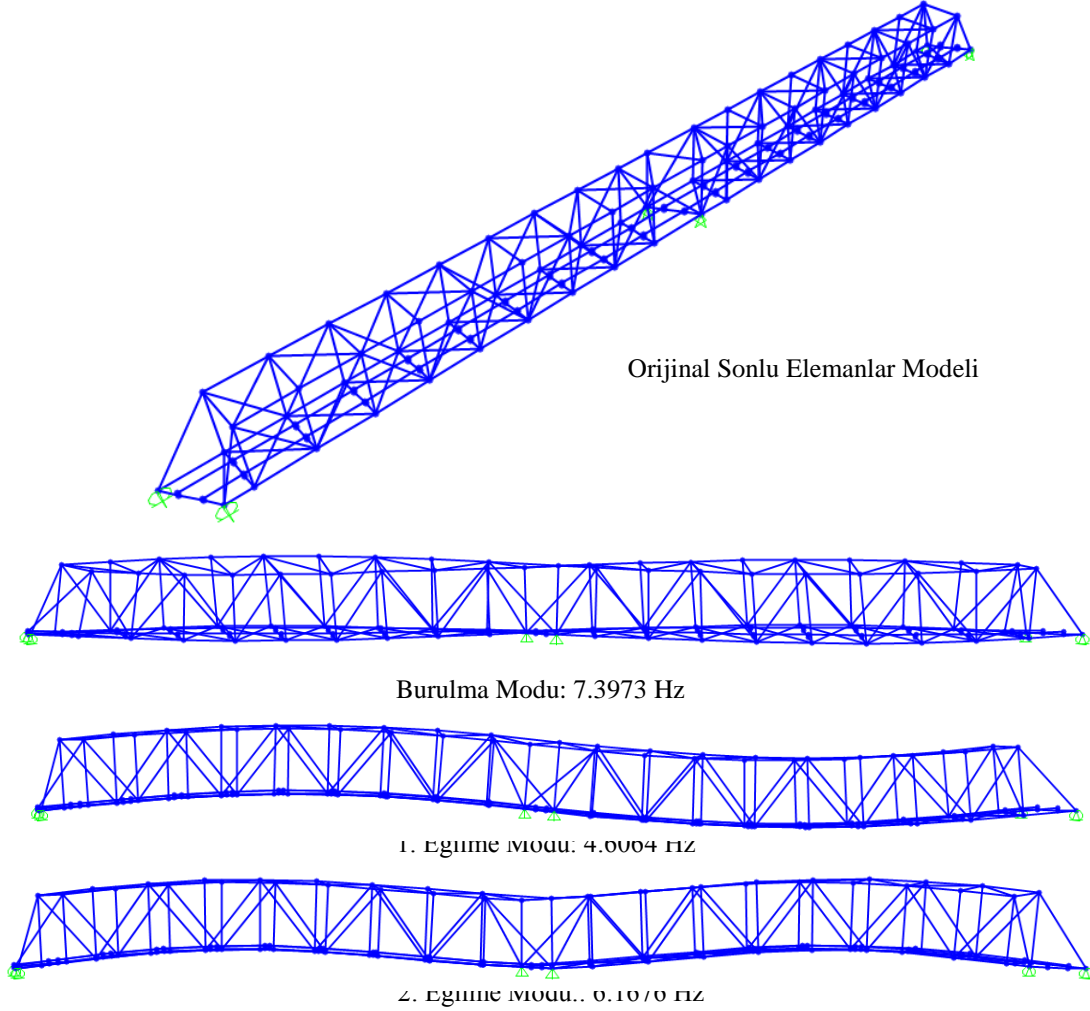
Şekil 2. Cambazkaya köprüsü

Cambazkaya köprüsüne ait arazi ölçüm sonuçlarına geçmiş yıllarda hazırlanan bir rapor [16]'dan ulaşılmıştır. Rapora göre köprü ilk üç modunun arazi ölçümü frekans değerleri burulma ve eğilme doğrultularında sırasıyla 8.8379 Hz, 4.8828 Hz ve 5.6641 Hz olarak tanımlanmıştır. İlgili modlara ait mod şekilleri ve frekans değerleri Şekil 3' de verilmiştir.



Şekil 3. Cambazkaya köprüsü arazi ölçümü sonuçları [16]

Köprünün sonlu elemanlar modeli SAP2000 programı aracılığıyla, köprüye ait orijinal çizim paftalarına göre oluşturulmuş ve dinamik analiz ile köprünün modal parametreleri elde edilmiştir. Böylece, köprü ilk üç moduna ait frekans değerleri burulma ve eğilme doğrultularında sırasıyla 7.3973 Hz, 4.6064 Hz ve 6.1676 Hz olarak tanımlanmıştır. İlgili modlara ait mod şekilleri ve frekans değerleri Şekil 4' te ve Çizelge 1' de verilmiştir.



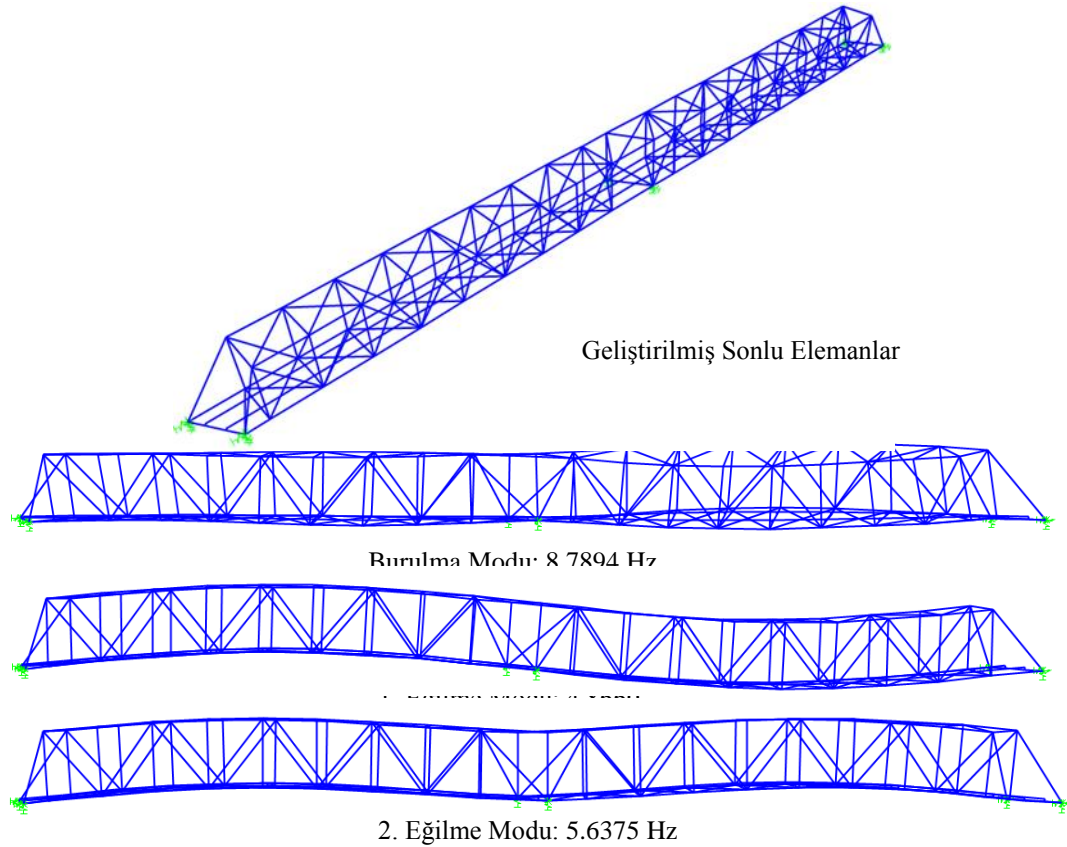
Şekil 4. Cambazkaya köprüsü orijinal modelin modal analiz sonuçları

Çizelge 1. Cambazkaya köprüsü orijinal modele ait frekanslar

Mod	Orijinal modele ait analitik frekanslar f_i (Hz)	Arazi ölçüm frekansları f_o (Hz)	Hata yüzdesi e (%)
Burulma modu	7.3973	8.8379	16.3
1. eğilme modu	4.6064	4.8828	5.7
2. eğilme modu	6.1676	5.6641	8.9

Arazi ölçüm çalışmalarından elde edilen sayısal değerler, analitik modele ait sonuçlar ile kıyaslandığında burulma modunda %15 civarında bir farklılık göze çarpmaktadır. Bu farkın, köprü orijinal modelinin kalibrasyonu ile düşülmesi hedeflenmektedir. Bu amaçla, orijinal

analitik modele ait sınır şartları değiştirilip yerine lineer yaylar atanarak ve bu yay katsayılarının rijitlikleri uyarlanarak yeni bir geliştirilmiş köprü modeli oluşturulmuştur. Geliştirilmiş model üzerinde atanan yay katsayılarının kalibre edilmesi ile arazi ölçüm sonuçlarına, başlangıç modelindekinden daha yakın sonuçlara ulaşılmıştır. Yeni durumdaki geliştirilmiş modelin ilk üç moduna ait analitik frekans değerleri burulma ve eğilme doğrultularında sırasıyla 8.7894 Hz, 4.8660 Hz ve 5.6375 Hz olarak tanımlanmıştır. İlgili modlara ait mod şekilleri ve frekans değerleri Şekil 5’te sunulmuştur. Frekans değerlerine ait kıyaslama sonuçları Çizelge 2’de özetlenmiştir. Görüldüğü üzere analitik model ile arazi ölçüm sonuçları arasındaki fark %1’in altındadır.

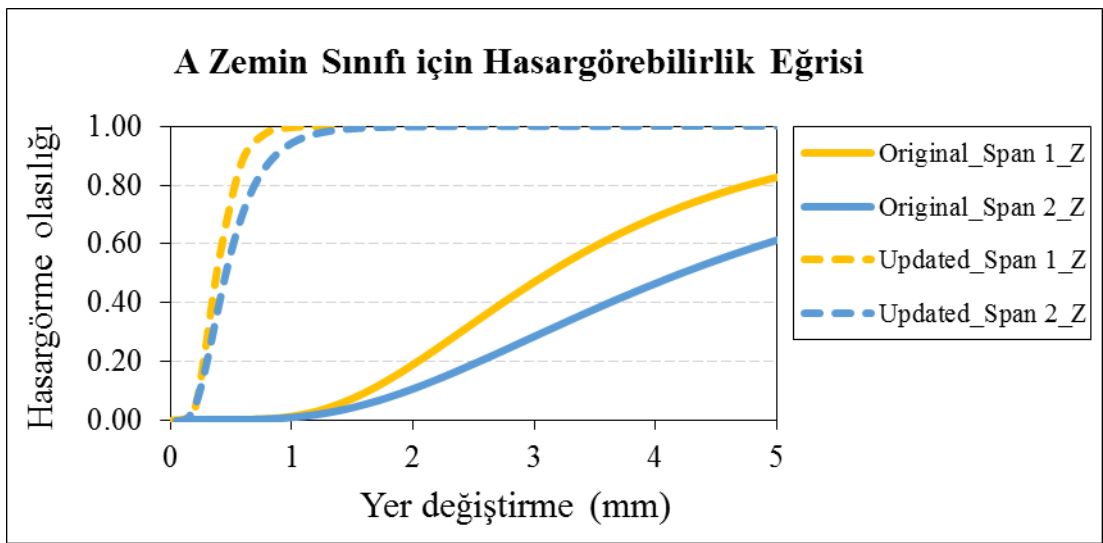
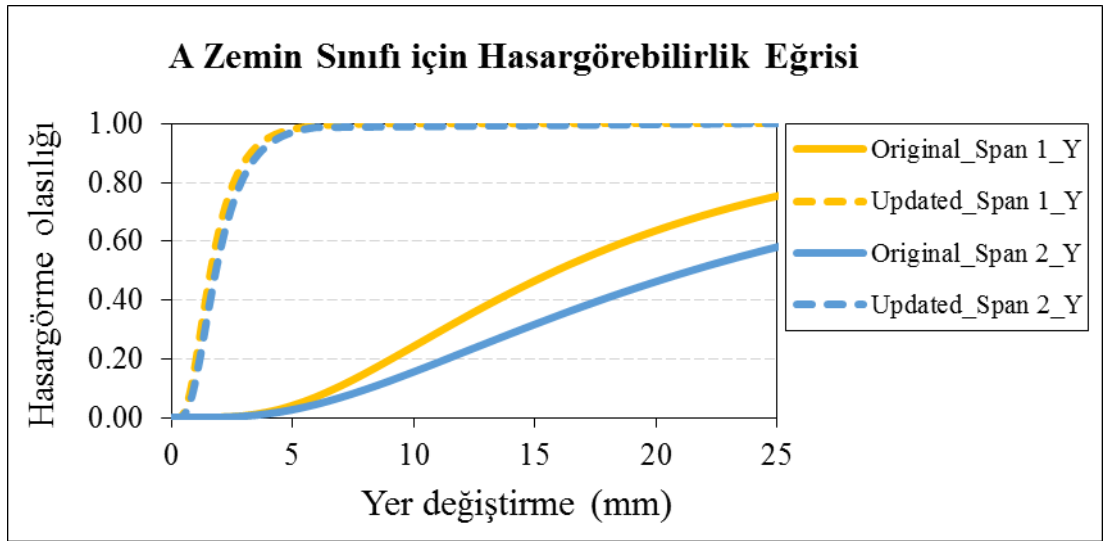
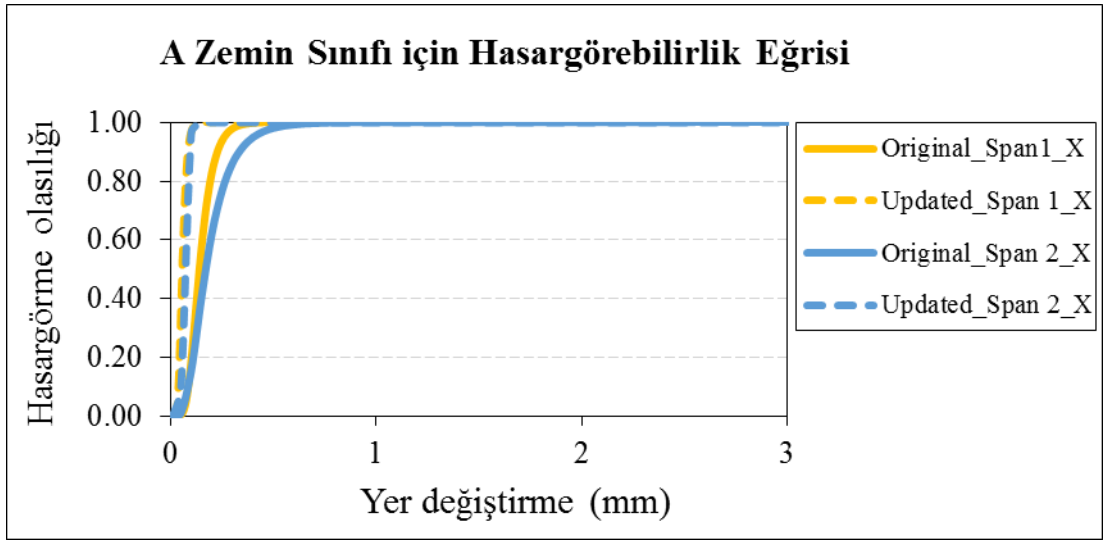


Şekil 5. Cambazkaya köprüsü geliştirilmiş modelin analitik sonuçları

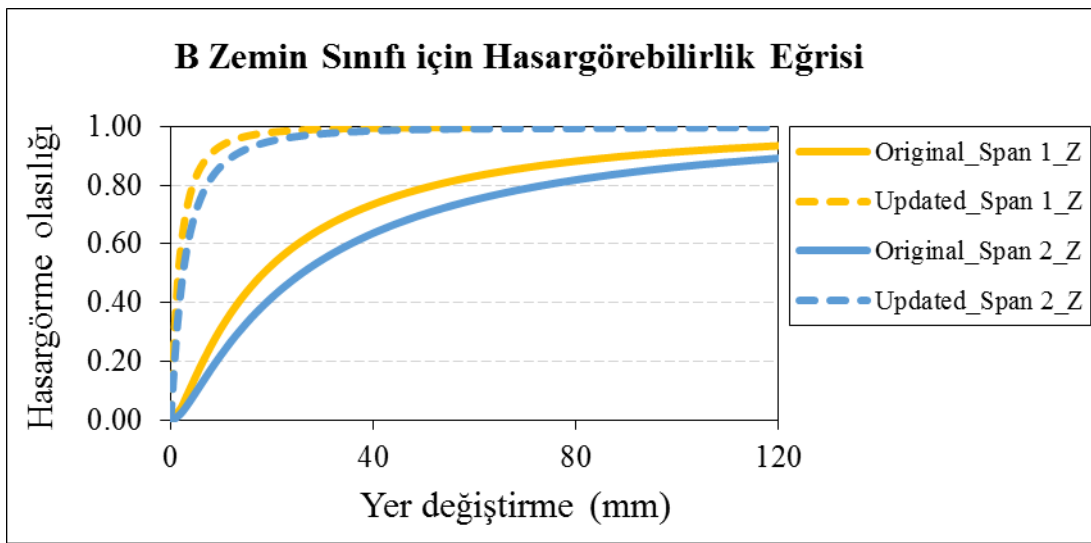
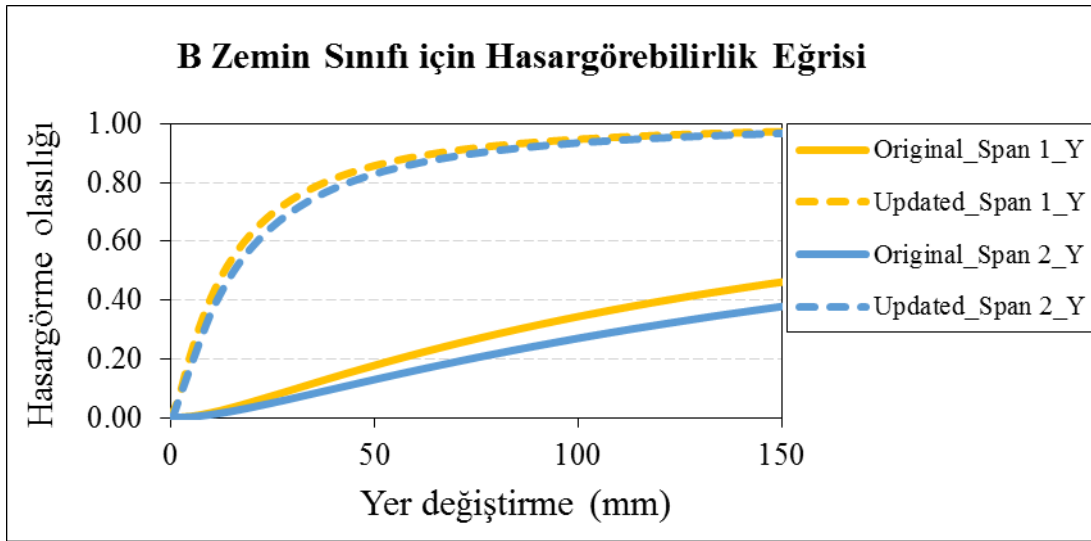
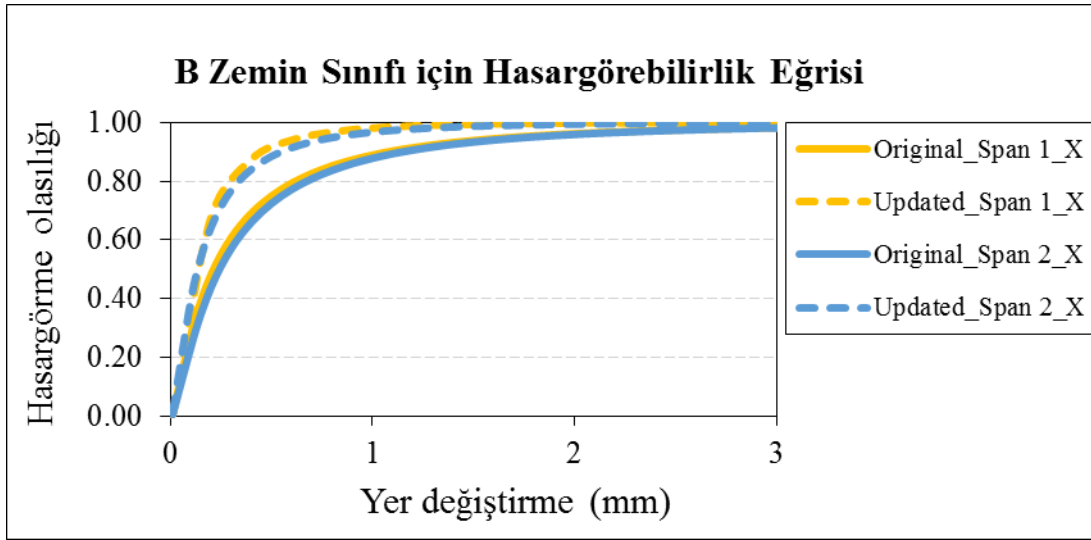
Çizelge 2. Cambazkaya köprüsü orijinal ve geliştirilmiş modellere ait frekanslar

Mod	Analitik frekanslar		Arazi ölçüm frekansları	Hata yüzdesi	
	f_i (Hz)			e (%)	
	Kalibrasyon öncesi	Kalibrasyon sonrası	f_o (Hz)	Kalibrasyon öncesi	Kalibrasyon sonrası
Burulma modu	7.3973	8.7894	8.8379	16.3	0.5
1. eğilme modu	4.6064	4.8660	4.8828	5.7	0.3
2. eğilme modu	6.1676	5.6375	5.6641	8.9	0.5

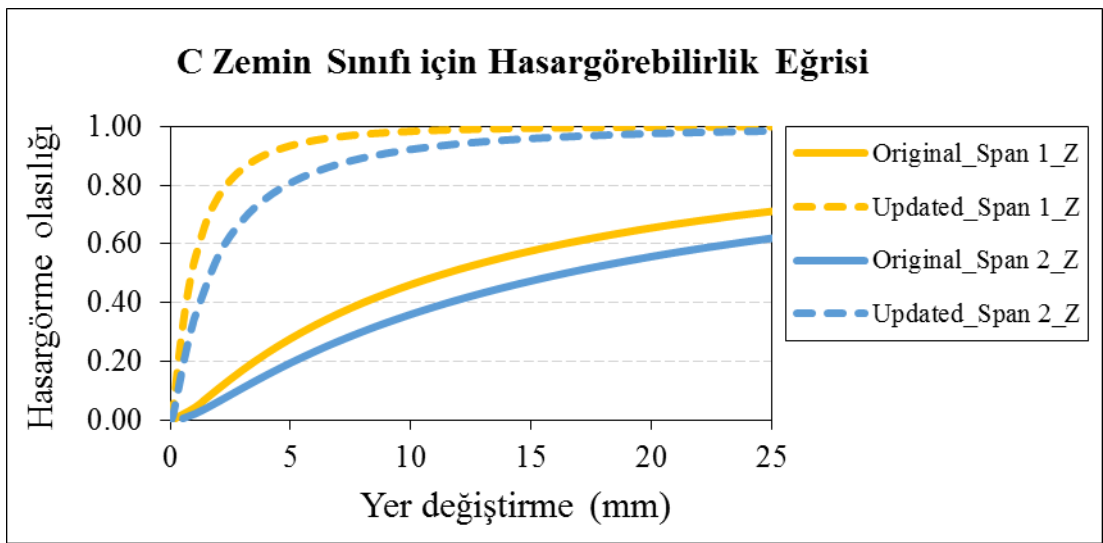
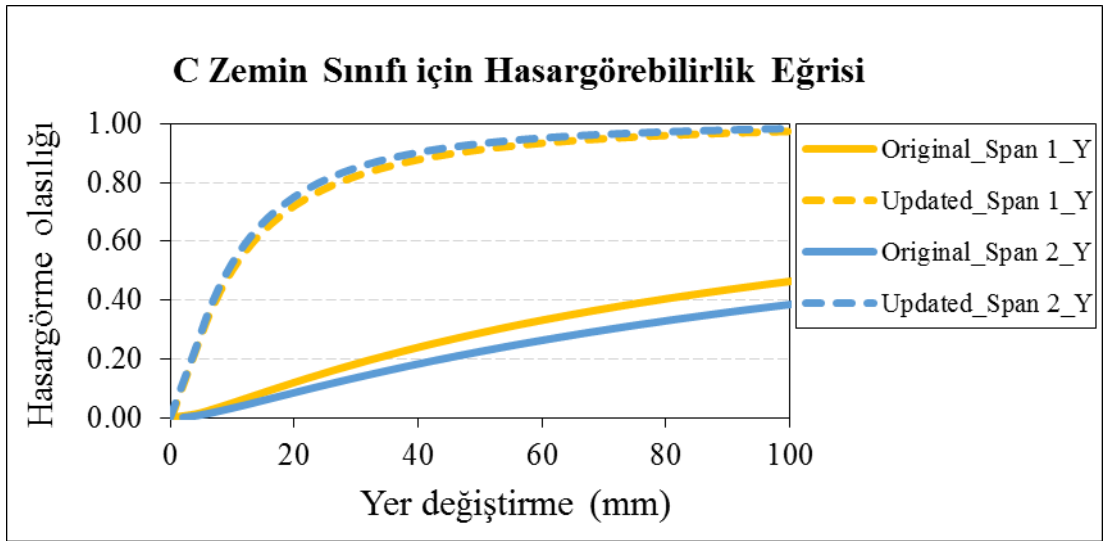
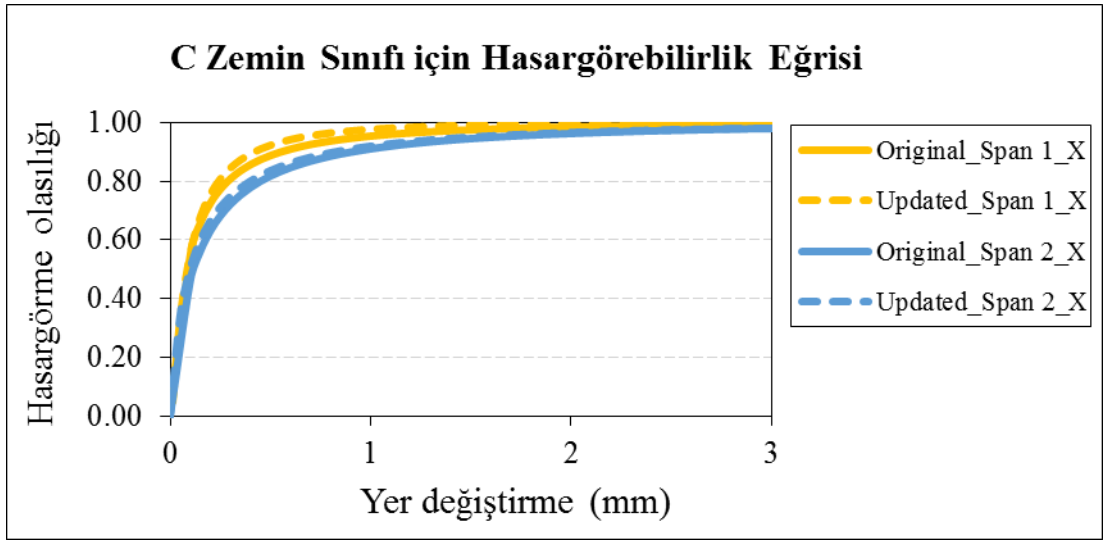
Son olarak çalışma kapsamında Cambazkaya köprüsüne ait hasargörebilirlik eğrileri elde edilmiş ve bu eğriler Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8’de sunulmuştur.



Şekil 6. A zemin sınıfı için Cambazkaya köprüsünün orijinal ve geliştirilmiş sonlu elemanlar modellerine ait hasargörebilirlik eğrilerinin kıyaslanması



Şekil 7. B zemin sınıfı için Cambazkaya köprüsünün orijinal ve geliştirilmiş sonlu elemanlar modellerine ait hasargörebilirlik eğrilerinin kıyaslanması



Şekil 8. C zemin sınıfı için Cambazkaya köprüsünün orijinal ve geliştirilmiş sonlu elemanlar modellerine ait hasargörebilirlik eğrilerinin kıyaslanması

Bu grafiklere göre orijinal köprü modeli için şu çıkarımlar yapılmıştır:

- X doğrultusunda 1 mm yer değiştirme için hasargörebilirlik olasılığı A zemin sınıfı için %100 iken, diğer zemin sınıfları için %90'dır. İkinci açıklık, birinci açıklığa göre %5 civarında daha düşük sonuçlar vermiştir.
- Y doğrultusunda 4 cm yer değiştirme için hasargörebilirlik olasılıkları A zemin sınıfında birinci ve ikinci açıklıklar için sırasıyla %90 ve %80, diğer zemin sınıfları için %25'tir.
- Z doğrultusunda 1 cm yer değiştirme için hasargörebilirlik olasılıkları A zemin sınıfında 1. açıklık için %100, diğer zemin sınıfları için %40'tır. İkinci açıklık, birinci açıklığa göre %10 daha düşük sonuçlar vermiştir.

Benzer şekilde geliştirilmiş köprü modeli için elde edilen sonuçlar ise şöyledir:

- X doğrultusunda 1 mm yer değiştirme için hasargörebilirlik olasılığı A zemin sınıfı için %100 iken, diğer zemin sınıfları için %90'dır.
- Y doğrultusunda 4 cm yer değiştirme için hasargörebilirlik olasılıkları A zemin sınıfı için %100, B zemin sınıfı için %80 ve C zemin sınıfı için %85'tir.
- Z doğrultusunda 1 cm yer değiştirme için hasargörebilirlik olasılıkları A zemin sınıfı için %100, B zemin sınıfı için %90 ve C zemin sınıfı için %100'dür.

SONUÇLAR

Bu çalışma ile iki açıklıklı mesnetlerde sürekli bir köprü olan Cambazkaya köprüsünün analitik modeli, arazi ölçümü sonuçları ile kıyaslanmıştır. Başlangıçta ölçüm sonuçları arasındaki fark %15 civarında iken, uygulanan model geliştirme işlemleri ile bu fark %1'in altına indirilmiştir. Sonrasında, geliştirilmiş ve orijinal sonlu elemanlar modellerine ve farklı zemin sınıflarına ait hasargörebilirlik eğrileri elde edilmiştir. Eğrilerin kıyaslanması ile şu sonuçlara varılmıştır:

- X doğrultusunda 1 mm yer değiştirme oldukça kritiktir ve hasargörebilirlik olasılığı bu doğrultu için %90'ın üzerindedir.
- Y doğrultusunda kalibrasyon sonrasında B ve C zemin sınıfları için hasargörebilirlik olasılığının oldukça yükseldiği ve yaklaşık olarak 3.5 kat arttığı gözlemlenmiştir.
- Z doğrultusundaki hasargörebilirlik olasılığı kalibrasyon sonrasında 2 katına çıkmıştır.

Sonuçlar irdelendiğinde, hasargörebilirlik oranlarının geliştirilmiş modelde daha yüksek olduğu göze çarpmaktadır. İnşa edildiği günden bu yana köprüde meydana gelen yapısal bozulmalar göz önüne alındığında bu durum olasıdır. Bu yüzden, iki açıklıklı sürekli kirişli bir kafes köprüde, oluşturulan sonlu elemanlar modeli, arazi ölçümleri sonucu elde edilen veriler kapsamında değerlendirilmeli ve arazi çalışmalarının sonuçları esas alınarak model kalibrasyonu yapılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] U. K. Gosh, *Design and Construction of Steel Bridges*. London: Taylor & Francis Group, 2006.
- [2] A. Pipinato, M. De Miranda, *Steel and Composite Bridges. Innovative Bridge Design Handbook: Construction, Rehabilitation and Maintenance* (s. 247-271), 2016.
- [3] M. Shinozuka, M. Q. Feng, J. Lee, T. Naganuma, Statistical analysis of fragility curves. *J Eng Mech-ASCE*, 126, 12, (2000a), 1224-1231.

- [4] Applied Technology Council (ATC). *Earthquake damage evaluation data for California* (Rapor No: ATC-13). Redwood City, California 1985.
- [5] F. Yamazaki, H. Motomura, T. Hamada, Damage assessment of expressway networks in japan based on seismic monitoring. *12th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. 0551, 2000.
- [6] K. Karim, F. Yamazaki, Effect of earthquake ground motions on fragility curves of highway bridge piers based on numerical simulation. *Earthquake Engng Struct Dyn*, 30, 2000, 1839–1856.
- [7] N. I. Basöz, A. S. Kremidjian, S. A. King, Statistical analysis of bridge damage data from the 1994 Northridge, CA, Earthquake. *Earthq Spectra*, 15, 1, (1999) 25-54.
- [8] H. Hwang, J. B. Jernigan, Y. W. Lin, Evaluation of seismic damage to Memphis bridges and highway systems. *J Bridge Eng-ASCE*, 5, (2000). 322–330.
- [9] J. B. Jernigan, H. Hwang, Development of bridge fragility curves. *In Proceedings of 7th US National Conference on Earthquake Engineering*. Boston: EERI 2002.
- [10] A. Dutta, J. B. Mander, Seismic fragility analysis of highway bridges. *INCEDEMCEER Center-to-Center Workshop on Earthquake Engineering Frontiers in Transportation Systems*, (1998), 311-325, Tokyo, Japan.
- [11] M. Shinozuka, M. Q. Feng, H. Kim, S. Kim, Nonlinear static procedure for fragility curve development. *J Eng Mech.*, 126, (12) (2000b) 1287-1295.
- [12] H. Hwang, J. B. Liu, Y. H. Chiu, Seismic fragility analysis of highway bridges. *Technical Report* Center for Earthquake Research and Information The University of Memphis (2001).
- [13] A. C. Cornell, F. Jalayer, R. O. Hamburger, D. A. Foutch, D. A. Probabilistic basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency steel moment frame guidelines, *J. Struct. Eng.*, 128, (2002) 526–532.
- [14] E. Choi, R. Desroches, B. G. Nielson, Seismic fragility of typical bridges in moderate seismic zones. *Eng Struct*, 26, (2004) 187-199.
- [15] B. G. Nielson, R. Desroches, R. Analytical seismic fragility curves for typical bridges in the central and southeastern United States. *Earthq Spect*, 23, 3, (2007) 615-633.
- [16] Computers and Structures (CSI) (2015). *CSI Analysis reference manual for SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge*, Berkeley, California, USA.
- [17] E. Uzgider, N. Gunduz, M. Aydogan, F. Piroglu, B. O. Caglayan, P. Rahmatian, B. Ilicali, Testing & evaluation of Cambazkaya railway bridge. *Nato Science for Stability Programme TU-850- Bridges Research Project 6* (1996).